

非洲马里气田天然氢气井勘探案例介绍及全球天然氢气勘探进展

苏宇通^{1,2}, 金之钧^{1,2,3,4}, 刘润超^{1,4}, 王璐^{1,2}

(1. 北京大学 能源研究院, 北京 100871; 2. 北京大学 地球与空间科学学院, 北京 100871; 3. 中国石化 石油勘探开发研究院, 北京 102206; 4. 北京大学 鄂尔多斯能源研究院, 内蒙古 鄂尔多斯 017010)

摘要: 为了促进中国天然氢气藏的勘探和开发, 推动天然氢气分布、富集机制以及成藏条件等方面的研究, 基于文献调研剖析了非洲陶德尼盆地马里天然氢气勘探实例, 同时介绍了全球天然氢气勘探进展。研究表明: 马里氢气田的氢最可能的来源是西非克拉通 Leo-Man 地盾 2.2~2.1 Ga 岩石的活跃蛇纹石化作用, 是岩石中的二价铁与水反应的产物。该氢气田发育两种类型的储层: 上部储层为白云质碳酸盐岩, 其中氢气主要以游离态存在; 下部储层为砂岩, 氢气主要以溶解态存在。氢气主要沿着断裂从氢源运移到储层, 并在辉绿岩盖层的封闭下成藏。全球从事天然氢气勘探的公司数量已从 2020 年的 3 家增加到 2023 年的 40 家, 多个国家已经开始发放氢气勘探许可证, 但总体而言天然氢气的勘探和开发还处于起步阶段, 成功案例较少, 需要加强科学探索和技术突破。

关键词: 清洁能源; 碳中和; 天然氢气; 氢气勘探; 马里气田; 陶德尼盆地; 非洲

中图分类号: TE132.3

文献标识码: A

Natural hydrogen exploration: A case study of hydrogen wells in the Mali gas field in Africa and global advances

SU Yutong^{1,2}, JIN Zhijun^{1,2,3,4}, LIU Runchao^{1,4}, WANG Lu^{1,2}

(1. Institute of Energy, Peking University, Beijing 100871, China; 2. School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China; 3. Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 102206, China; 4. Ordos Research Institute of Energy, Peking University, Ordos, Inner Mongolia 017010, China)

Abstract: This study aims to enhance the exploration and exploitation of China's natural hydrogen reservoirs and to advance research on the distribution, enrichment mechanisms, and accumulation conditions of natural hydrogen. Based on a literature review, we perform a case study of natural hydrogen exploration in the Mali hydrogen field within the Taoudeni Basin in Africa and introduce global advances in natural hydrogen exploration. The results reveal that the hydrogen in the Mali gas field most likely originates from the active serpentinization of 2.2–2.1 Ga rocks in the Leo-Man Shield of the West African Craton and, thus, is the product of reactions of ferrous irons in rocks with water. The Mali hydrogen field contains two distinct types of reservoirs, namely the upper dolomitic carbonate reservoir and the lower sandstone reservoir, where free hydrogen and dissolved hydrogen are primarily found, respectively. Hydrogen migrates from the source to these reservoirs primarily along faults, subsequently accumulating beneath diabase cap rocks. Increasingly more companies have engaged in natural hydrogen exploration worldwide, with their number surging from three in 2020 to 40 in 2023, and multiple countries have started to issue hydrogen exploration licenses. Nevertheless, the exploration and production of natural hydrogen are still in their initial stages, with only a few successful cases. Therefore, greater efforts are necessary to conduct scientific exploration and achieve technological breakthroughs.

Key words: clean energy, carbon neutrality, natural hydrogen, hydrogen exploration, Mali gas field, Taoudeni Basin, Africa

收稿日期: 2024-01-09; 修回日期: 2024-07-06。

第一作者简介: 苏宇通 (1998—), 男, 博士研究生, 天然氢相关研究。E-mail: 2101110635@stu.pku.edu.cn。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42090025); 国家重点研发计划项目 (2019YFA0708504)。

引用格式: 苏宇通, 金之钧, 刘润超, 等. 非洲马里气田天然氢气井勘探案例介绍及全球天然氢气勘探进展[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(5): 1502–1510. DOI: 10. 11743/ogg20240520.

SU Yutong, JIN Zhijun, LIU Runchao, et al. Natural hydrogen exploration: A case study of hydrogen wells in the Mali gas field in Africa and global advances[J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(5): 1502–1510. DOI: 10. 11743/ogg20240520.

氢是太阳系中丰度最高的元素,其丰度值达到了90%以上^[1],它于1776年被卡文迪许(Henry Cavendish)发现,并于1783年由拉瓦锡(Antoine Lavoisier)定名^[2]。氢气的热值较高且燃烧仅会产生水,与大多数燃料相比其单位重量燃烧所释放的能量更多,被认为是一种清洁燃料。作为一种能源载体,氢气可以在减少化石燃料使用、应对全球变暖、促进“碳中和”等方面发挥重要作用^[3],因而其需求量不断增大。目前氢气的来源主要是工业制取。2022年,全球的氢气产量为 $9\,500 \times 10^4$ t,根据其制来源的不同,大致可分为“灰氢”、“蓝氢”和“绿氢”3种类型。所谓的“灰氢”是指由化石燃料制成的氢气,在其生产过程中会排放大量的 CO_2 ;“蓝氢”是指由化石燃料制成但生产过程中所产生的 CO_2 被捕集并重新利用的氢气;“绿氢”则是指利用风能、太阳能等可再生能源发电,再用这绿色电力电解水制成的氢气。这3种生产氢气的方式分别面临着 CO_2 排放、成本较高或效率较低等问题。

在2005年发表的论文中,Nigel Smith指出,“从地质的角度来看,氢气被人们所忽视”^[4]。自然界中有多种可以产生氢气的地质过程,在地质历史中产生氢气的总量也极其可观,前寒武纪大陆岩石圈每年预计可

产生氢气 $360 \times 10^8 \sim 2\,270 \times 10^8 \text{ mol}^{[5]}$,但在以往的地质调查中,对氢气的关注相对较少。这一方面是由于过去的许多探测仪器不具备检测氢气的能力^[6],即便所采集的气体样品富含氢气,合适的检测技术的缺乏导致样品中氢气含量无法进行测量,因而其中的氢气也难识别出来,这种情况究竟出现过多少次是很难估计的^[7]。另一方面,由于氢气作为所有气体中最轻的一种,它在不同介质中的扩散都非常快,导致人们对于地球中天然氢气的生成、扩散以及储存的机制缺乏认识。比如,与氢气生成相关的地球化学反应机制和反应速率,氢气在地球不同圈层的迁移和分馏机制,地下消耗氢气的过程以及能够储集和封闭氢气的地质条件等^[2]。

目前许多国家的研究人员和商业公司都在开展天然氢气的勘探研究,而且已经获得了一些发现(图1)。比如,在美国北卡罗莱纳州^[8]、巴西圣弗朗西斯科盆地^[9]、西澳大利亚珀斯盆地^[10]以及俄罗斯中部地区^[11]都检测到有氢气渗流的“仙女圈”,其中的氢气浓度最大甚至可达 $1\,000 \times 10^{-6}$;在世界各地的火山喷发气体^[12]、热泉气体^[13]中也记录到了氢气的存在。

2019年,在非洲马里的一口地下水探井中意外发现了纯度高达98%的氢气,后来加拿大的Hydroma公

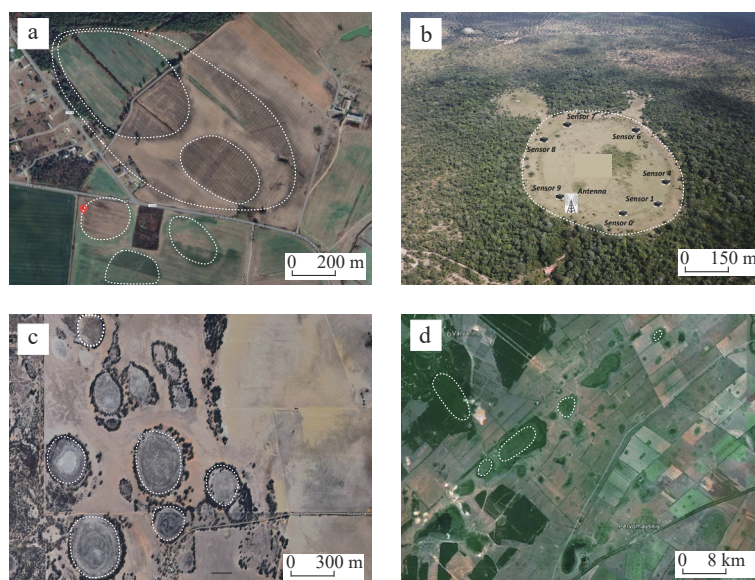


图1 世界各地的仙女圈

Fig. 1 Fairy circles across the world

a. 美国北卡罗莱纳州^[8]; b. 巴西圣保罗盆地^[9]; c. 西澳大利亚珀斯盆地^[10]; d. 俄罗斯中部地区^[11],有修改(a, c, d为卫星照片; b为航拍图。)

成。该组最底部的地层由向上粒度变细的粗粒至中粒河流相砂岩和浅海相砂岩组成^[18]。Atar组的上覆地层Assabet el Hassiane组由在新元古代晚期发育的细粒硅质碎屑岩地层构成,其沉积环境是前陆盆地河流三角洲^[18]。超群2以冰川沉积为主,发育在超群1之上或直接覆盖在基底之上,与其下伏地层呈侵蚀和角度不整合接触。这些冰川沉积物被一层薄且不连续的钙质白云岩(盖帽白云岩)所覆盖,而后者又被层状燧石和绿色页岩覆盖,这种被称为三位一体的岩相组合(闪长岩-白云岩-层状白垩岩)长期以来一直被用作标志地层。其所在的古地表是由外源性隆起和克拉通台地倾斜后的漫长侵蚀期形成的,一般认为与泛非I期的重大构造事件有关^[19]。超群3包括侵蚀不整合和局部角度不整合之上的奥陶纪冰川沉积和后冰期志留纪含笔石页岩^[19]。超群4对应于泥盆纪和石炭纪沉积,它们与志留系页岩或奥陶系冰川沉积呈不整合接触^[19]。

1.2 布瓦迪恩布古—布拉克布古(Bouadienbougou-Bourakebougou)地区地层特征

马里氢气井位于陶德尼盆地的25号区块,基底属于西非克拉通的Leo地盾,其下部称为Liberian,约2 700 Ma前高度变质、混合岩化和花岗岩化。太古宇以花岗岩、混合岩、斜长岩、砂砾岩和片岩为代表,具有高

铝质和铁锈质地层的片岩(磁铁石英岩)。基底的上部被称为Birimian,属于中前寒武纪地层(大约1 800 Ma前变质和花岗岩化),它包含火山喷出岩-角闪岩组合,以及含有复理石的岩石组合。整个Birimien系统可能被次火山相的花岗岩体侵入^①。

继Bougou-1井之后,研究人员对布拉克布古以北100 km(北纬13.84°和西经8.12°的地区)的2口井(F1井和F2井,深度分别为2 067 m和2 339 m)的样品进行了研究^①,其地层剖面如图3所示。F1井和F2井主要钻穿了3个群。上部地层的主要特征为由中粒砂岩与细粒砂岩、泥岩互层构成,具有较为常见的交错层理,沉积环境为潮间带—潮上带。该部分为具有两个突出的闪长岩层,一个在地层段的上部,另一个在下部。中间部分的主要特征为黑色页岩与中粒交叉层状砂岩构成,沉积环境为潮间带环境。下部地层的主要特征为细粒砂岩、粉砂岩和泥质灰岩。存在藻层和藻球结构,潮汐层理较为常见,中粒砂岩较为罕见。沉积构造表明其沉积在潮下沉积环境中。F1井和F2井均未钻透索鲁科托(Souroukoto)组的基底和中部。对岩心的详细观察以及在博迪布古(Bodiebougou)和布拉克布古(Bourakebougou)之间区域的勘测表明,这些钻井已经钻到了索鲁科托(Souroukoto)群第三段和第二段的边界上方。F1井和F2井钻透的地层序列被细分

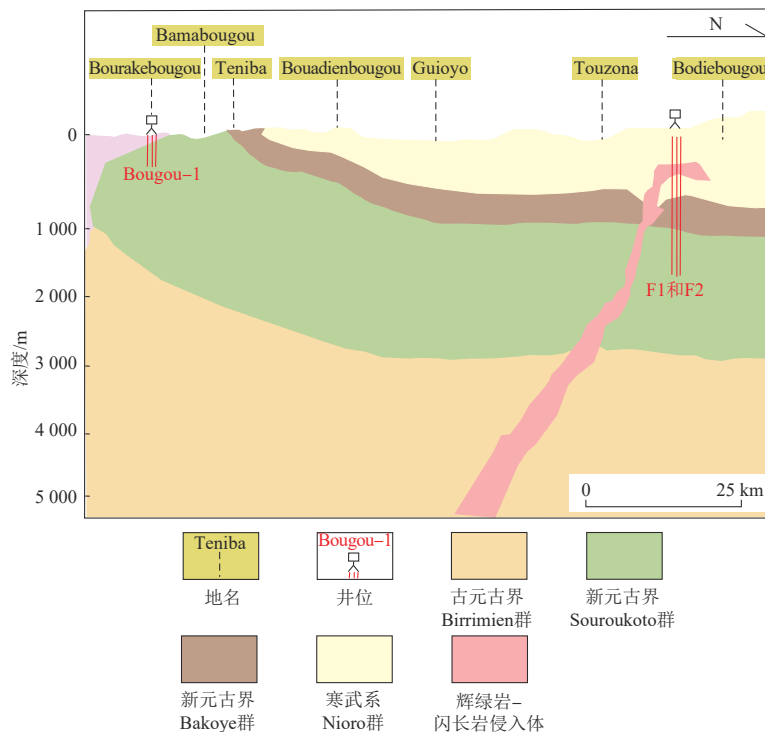


图3 马里布瓦迪恩布古(Bouadienbougou)—布拉克布古(Bourakebougou)地区地质剖面

Fig. 3 Geological section of the Bouadienbougou-Bourakebougou area in Mali

为3个层段。下段属于索鲁科托(Souroukoto)群,上段属于巴科耶(Bakoye)群^①。

1.3 马里的氢气系统

1.3.1 地球化学特征

在勘探钻井之前,Hydroma公司对马里25号区块进行了初步的土壤地球化学检测,对于该地的仙女圈进行深度1 m的地表土壤氢气调查。由氢气渗漏形成的仙女圈可能是氢气勘探的一个重要指示^[8,11]。在探井钻井的同时,随钻进行连续的气体检测和流体记录。该地区氢气的浓度剖面变化较大,氢气浓度最高可达 600×10^{-6} 。与其他研究区相比,马里的Bougou-1井采出气体呈现出不同的化学成分,图4展示了不同地区采出的含氢气体的化学成分。

为了初步查明该地区氢气的来源,鉴于惰性气体同位素对于地幔/地壳流体具有优异的示踪性^[21],研究人员使用惰性气体同位素进行示踪。结合该地区的氦、氖、氩、氪和氙的同位素(表1),考虑到地幔氦(1.12×10^{-5})和地幔氩(3×10^{-4})的同位素比率与Bougou-1井采出气体的差异很大,研究人员认为没有来自地幔的任何贡献,这表明这里的氢气可能来自于玄武岩或者基底。

1.3.2 氢气的可能源、储层及盖层

Hutchinson等人基于对马里陶德尼盆地中氢气藏的认识而构建了一个大陆“氢系统”的模型,主要由源岩、水、作为盖层的地层以及充当氢气运移路径的断层

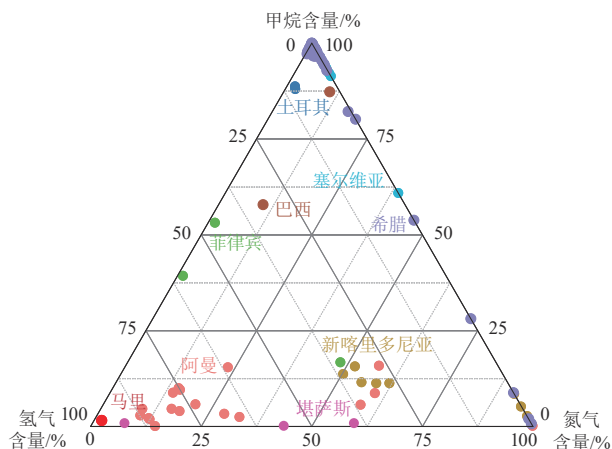


图4 不同地区含有天然氢的各种气体样品的氢气、甲烷和氮气的相对含量端元图^[15, 20](有修改)

Fig. 4 Ternary diagram of the relative contents of hydrogen, methane, and nitrogen in various natural gas samples containing hydrogen from different regions^[15, 20] (modified)

表1 马里Bougou-1井惰性气体同位素浓度及同位素浓度比值^[15]

Table 1 Noble gas isotope concentrations and isotope ratios in the well Bougou-1 in Mali^[15]

类别	参数	分离器中	井口中
同位素浓度	$^4\text{He}/10^{-6}$	547	552
	$^{20}\text{Ne}/10^{-6}$	0.2	0.4
	$^{36}\text{Ar}/10^{-6}$	0.5	0.6
	$^{84}\text{Kr}/10^{-6}$	0.0167	0.0183
	$^{129}\text{Xe}/10^{-9}$	0.9	13.9
同位素浓度 比值	$^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$	400	384
	$^3\text{He}/^4\text{He}$	6.1×10^{-8}	8.2×10^{-8}

组成^[22]。

布拉克布古(Bourakebougou)地区氢最可能的来源被认为是西非克拉通 Leo-Man 地盾 2.2 ~ 2.1 Ga 岩石中活跃蛇纹石化作用^[23]。蛇纹石化是一种水-岩反应的变质过程,其中主要是岩石中的二价铁与水反应,生成氢气^[7]。

马里南部地下水系统发育,含水层分布在松散的白垩纪—古近纪沉积地层、新元古代沉积地层以及裂隙基底中^[23]。这些含水层在地质历史上的河流泛滥事件(尼日尔内河三角洲)期间重新充满水,并且在全新世潮湿气候时期有来自降雨的补给。水与岩石进行水-岩反应,形成氢气。

研究人员在 Bougou-19 井(图5)中 110 ~ 150, 330 ~ 390 和 465 ~ 520 m 深度段都检测到了氢气聚集,在 Bougou-6 井的 800 ~ 1 040 m 和 1 130 ~ 1 460 m 深度段也检测到了两个较深的富集带。氢气聚集主要发育在两种类型的地层中,碳酸盐岩层和砂岩层。研究人员认为浅部的含氢气储层主要由白云质碳酸盐岩(新元古代冰川期的盖帽碳酸盐岩)组成。该地区的白云质碳酸盐岩普遍发生喀斯特化,形成了一个覆盖整个区域的喀斯特系统,其中发现了大规模的氢气聚集,而且氢气主要以游离态存在。深部氢气主要赋存于某些砂岩储层和裂缝性基底中,其中氢气主要以溶解态存在。

Maiga 等人认为布拉克布古(Bourakebougou)地区的盖层主要为辉绿岩基岩^[21]。目前找到的证据包括以下几个方面:①辉绿岩的厚度与氢气圈闭之间的相关性,即辉绿岩的厚度越大,其下探测到的氢气浓度越高。富氢气的井位于辉绿岩层最厚的区域。②针对 Bougou-6 井 3 个不同深度的样品进行了孔隙度和渗透率测量,发现随着深度的减小,其孔隙度不断减小,由 3.03 % 降至 0.39 %,渗透率为“不渗透-扩散”状态(表2);③粉砂质页岩层与氢气圈闭存在相关性,辉绿

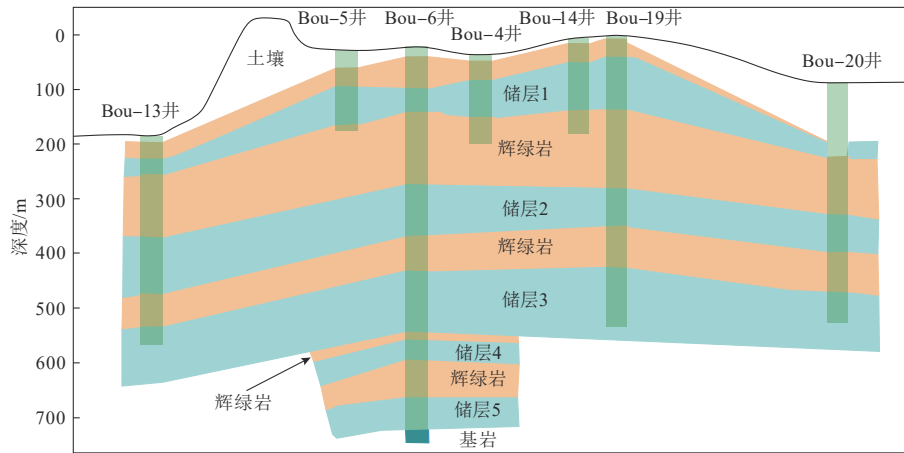


图 5 马里布拉克布古(Bourakebougou)气田 Bou-13 井—Bou-5 井—Bou-6 井—Bou-4 井—Bou-14 井—Bou-19 井—Bou-20 连井剖面示意图^[15](有修改)

Fig. 5 Schematic diagram showing hydrogen accumulation crossing wells Bou-13, Bou-5, Bou-6, Bou-4, Bou-14, Bou-19, and Bou-20 in the Bourakebougou gas field, Mali, Africa^[15](modified)

表 2 马里氢气田 Bougou-6 井 3 个岩样的孔隙度和渗透率测量值^[21]

Table 2 Measured porosity and permeability of three samples from well Bougou-6 in the Mali gas field, Africa^[21]

深度/m	孔隙度/%	渗透率
55.5	0.39	不渗透-扩散状态
211.7	3.25	不渗透-扩散状态
220.7	3.03	不渗透-扩散状态

岩下方粉砂质页岩层厚度大的地方,检测到的氢气浓度反而较低,这说明粉砂质页岩层对于封闭氢气没有多大作用(图 6)。基于此,研究人员认为上部储层中的游离气体被顶部厚的辉绿岩层封闭,这些基岩的裂缝孔隙度非常低,具有较强的封闭能力,能够阻止

氢气向地表渗漏。与顶部的辉绿岩封盖层相比,下部辉绿岩层的裂缝孔隙度略高一些,这为来自地下深部的氢气向上运移进入顶部储集层提供了条件^[21]。

断裂是马里氢气田中氢从源岩到储层的主要运移路径,陶德尼盆地的断层在其地质历史中可能发生过多次的再活化,例如白垩纪 Nara^[24]和 Timetrine 地堑^[25]的发育。

2 天然氢气勘探现状

石油和天然气勘探始于 19 世纪中叶,而对于含油气系统、烃源岩、烃类生成和运移等的研究其开始时间则晚的多。直到 20 世纪 30 年代,分析化学的进步才使

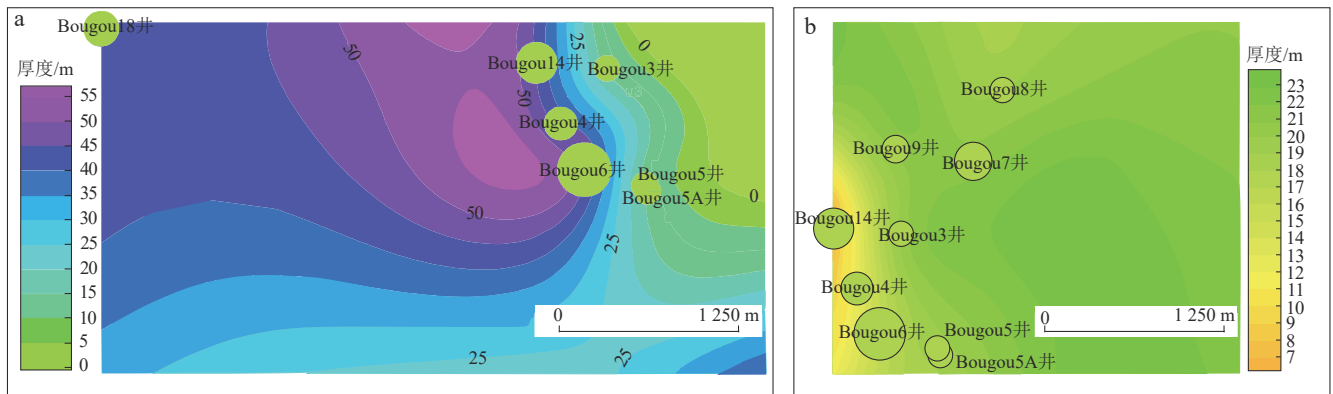


图 6 马里氢气田布拉克布古(Bourakebougou)区域辉绿岩盖层厚度(a)和位于辉绿岩盖层下方的粉砂质页岩层厚度(b)与氢气含量的关系^[21]

Fig. 6 Isopach maps of diabase cap rocks (a) and silty shale layers underlying the diabase cap rocks (b) in the Bourakebougou area within the Mali gas field, Africa^[21]

(圆圈的圆心位置即为井点位置,绿色圆圈的大小与气测过程中检测到的氢气平均含量成正比。)

得人们将石油与有机成因联系起来;直到20世纪60年代,人们才对石油的源岩、储层、盖层、圈闭、运移和保存有了充分的了解^[15]。目前,天然氢气的勘探研究正处于一个与油气发展初期非常类似的起步阶段。

2.1 针对天然氢气的科学研究

在科学研究方面,目前主要工作是针对地表土壤进行氢气检测以及对钻井中采集的天然氢气样品进行分析。Lefevre等人已在比利牛斯造山带及前陆盆地约7 500 km²的区域以10 km×10 km的网格开展了地表土壤氢气调查,尝试在尚无地表氢气苗记录的区域开展氢气探测。在收集的土壤气样品分析数据中,氢气浓度大多数低于50×10⁻⁶,有6个数据超出了传感器的极限(浓度>1 000×10⁻⁶)^[29]。Lefevre等认为比利牛斯山西北部可能是氢气勘探的远景区,其依据是这里存在有利于蛇纹石化的温压条件,逆冲断层比较发育,而且发育一套由互层的石膏-硬石膏与石灰岩-白云岩构成的封盖层,其孔隙度只有1%~10%^[29]。

Prinzhofer等在巴西圣弗朗西斯科盆地的仙女圈中安装了永久性气体监测分析仪,以对于仙女圈中的氢气渗流进行观测和解释,他们发现该处仙女圈的氢气渗流似乎呈一定的周期性。金之钧等在三水盆地进行表层地质调查时发现了高的氢气异常渗流点,现场检测到的氢气浓度低的只有50×10⁻⁶,而高的则超过2 000×10⁻⁶,实验室测试的最大值高达6 948×10⁻⁶^[30]。现有的表层氢气勘探主要在干燥的土壤环境中进行,而对于存在地下水的潮湿环境中的氢气检测,Davis等人提出一种新技术,从专用浅井中采集地下水液面上部气体样品,分析氢气通量及其随时间的变化。这项技术在西澳大利亚伊尔根克拉通(Yilgarn Craton)的几口含水浅井中成功地得到了应用^[31]。除了进行实地的氢气调查之外,地震勘探和重磁测量技术也可以用于辅助氢气勘探。

国内也有不少天然氢气相关的研究报道。孟庆强等^[32]在济阳拗陷中发现了氢气的广泛分布;韩双彪等^[33]报道了松辽盆地不同地区钻井中的天然氢气,所采集气体样品的氢气浓度主要在0.001%~1.990%,在Fangshen-7井检测到了高达10.744%的氢气浓度;王璐等对松辽盆地的氢气赋存机制进行了研究,认为登娄库组、营城组的泥岩中氢气以吸附态的形式存在^[34]。

2.2 天然氢气的商业勘探

全球天然氢气勘探活动在逐步增强,从事天然氢气勘探的公司数量明显增加,截至2023年年中,活跃的公司已达40家,而2020年只有3家。虽然一些国家的氢

气勘探项目因缺乏相关的监管框架而进展缓慢,但有多国家的天然氢气勘探进展明显,马里、美国、法国、澳大利亚和西班牙等国已经开始发放氢气勘探许可证^[35]。

2018年11月至2019年3月,美国Natural Hydrogen Energy LLC公司完成了Hoarty NE3井的钻探,这是一口以天然氢气为目标的探井^[36]。美国纽约Ascent Funds Management LLC基金管理有限责任公司宣布将与Helios Aragon公司联合开发“金氢”,即地表下的天然氢。2018年成立的Helios Aragon公司已获得西班牙北部阿拉贡省面积890 km²的天然氢气勘探许可证,其中一口井在地表下3 680 m深处钻遇氢气含量异常高的含气层^[37]。

法国45-8能源公司认为法国存在多个有利于天然氢气藏发育的地质区,并启动了Fonts-Bouillants天然氢气勘探试点项目,2021年初已正式获得勘探许可证^[38]。

澳大利亚的氢气勘探也已经提上了议事日程,以南澳大利亚为例,自2021年2月以来,已有数家公司提交了40多份针对天然氢气的勘探许可证申请,第一份氢气勘探许可证于2021年7月被授予Gold Hydrogen Pty Ltd公司^[39]。该公司于2023年10月下旬启动了澳大利亚第一口天然氢专探井Ramsay1井的钻探作业,Ramsay2井的钻探也已于2023年11月中旬启动,现场测试和实验室测量发现在地面以下240 m深处经空气校正的氢气浓度为73.3%,与1931年Ramsay1井报告的经空气校正的氢气浓度76.0%基本一致^[39]。

各国对于天然氢气这一新兴资源勘探的立法也在探索之中。2021年2月,澳大利亚修订了相关法案,允许持石油勘探许可证的公司进行天然氢气的勘探,法国于2022年4月将天然氢气纳入采矿法规。

与上述国家相比,目前中国在天然氢气勘探及研究方面开展的工作还非常少,尚未见到有关氢气勘探井的报道。虽然就全球而言天然氢气的工业化开发仍处于早期阶段,但它有潜力成为氢气供应的重要来源,而且具有生产成本相对较低(天然氢气的生产成本预计在0.5~1.0美元/kg^[36])和零碳排放的优势,因而有必要加大研究力度来评估这一资源的潜力。

2.3 天然氢气的勘探前景以及存在的挑战

天然氢气的富集需要有氢源和运移通道。其中,天然生氢机制主要包括水-岩反应(其本质是二价铁与水在一定温度下的氧化还原反应)、地球内部脱气以及水的辐解。运移通道主要是由断层构成。因此在氢气勘探过程中应重点关注具有这种地质条件的地区。马里所在的陶德尼盆地存在着许多富铁基岩,并且这

些岩石中发育由走滑构造作用形成的花状断层^[40]。法国比利牛斯造山带的裂谷盆地由于造山运动而导致其所在区域的地壳相对较薄。Mauléon盆地下方8~10 km就是蛇纹石化的地幔岩石,是氢气潜在的来源,并且北比利牛斯断层充当了流体运移的优势通道。这使得北比利牛斯山麓成为了氢气勘探的远景区。综合上述来看,有利的氢气发育区可能主要存在于缝合带处。缝合带富蛇绿岩,为氢气的产生提供了一定的物质基础;同时,断层在缝合带中广泛发育,有利于氢气的运移^[41]。

虽然天然氢气的勘探前景广阔,但也面临很大的挑战,同时也引发了人们的一些担忧。Derwent在一份报告中指出,虽然天然氢本身不是一种污染物,但它可以参与大气的化学反应,这些化学反应可能导致环境破坏,有可能对大气平流层中的臭氧层和全球气候造成不良影响^[42]。此外,目前天然氢气勘探的目标主要是非生物成因的氢气,而地下深处天然微生物生成氢气的意义目前尚不清楚^[43]。

3 结语

天然氢气是一个新兴的研究领域,对其认知尚处于初期阶段,天然氢气的生成机制、在地壳中的储集方式以及其运移路径等,都是当前科学研究的热点课题。马里的氢气田为我们提供了一个可供参考的研究范例,该地区的断层为氢气的运移提供了主要通道,而辉绿岩层则形成了有效的氢气盖层,起到了封闭氢气藏的作用。在马里氢气勘探成功的带动下,全球范围内有越来越多的研究人员和商业公司开始投入到氢气勘探及相关研究中,希望能够在不同地质背景下找到类似的氢气生成和储集模式。与此同时,天然氢气作为一种清洁能源的巨大潜力也引起了广泛关注。随着氢能经济的不断发展,天然氢气可能成为未来氢能供应的重要来源之一。

然而,目前天然氢气的勘探和开发仍处于起步阶段,成功案例很少,需要进一步的科学探索和技术突破。与国外相比,中国在天然氢气勘探和研究方面尚未开展实质性的工作,尚未有关于天然氢气钻探的报道,需要加大关注的程度和投入的力度。为此,建议加大对天然氢气相关研究的资助力度,吸引更多的科研力量和商业投资进入这一领域。同时,需要通过政策引导和市场激励,鼓励业界重视并积极开展天然氢气的勘探。通过国际合作和技术交流,借鉴国外成功经验,加快天然氢气勘探的步伐,为实现能源转型和可持续发展贡献力量。

参 考 文 献

- [1] ANDERS E, GREVESSE N. Abundances of the elements: Meteoritic and solar [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1989, 53(1): 197-214.
- [2] MILKOV A V. Molecular hydrogen in surface and subsurface natural gases: Abundance, origins and ideas for deliberate exploration[J]. *Earth-Science Reviews*, 2022, 230: 104063.
- [3] HANLEY E S, DEANE J P, GALLACHÓIR B P Ó. The role of hydrogen in low carbon energy futures-A review of existing perspectives [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 82(Part 3): 3027-3045.
- [4] SMITH N J P, SHEPHERD T J, STYLES M T, et al. Hydrogen exploration: A review of global hydrogen accumulations and implications for prospective areas in NW Europe[C]//DORÉ A G, VINING B A. *Petroleum Geology: North-West Europe and Global Perspectives—Proceedings of the 6th Petroleum Geology Conference*. London: Geological Society of London, 2005: 349-358.
- [5] LOLLAR B S, ONSTOTT T C, LACRAMPE-COULOUME G, et al. The contribution of the Precambrian continental lithosphere to global H₂ production[J]. *Nature*, 2014, 516(7531): 379-382.
- [6] SMITH N J P. It's time for explorationists to take hydrogen more seriously[J]. *First Break*, 2002, 20(4): 246-253.
- [7] ZGONNIK V. The occurrence and geoscience of natural hydrogen: A comprehensive review [J]. *Earth-Science Reviews*, 2020, 203: 103140.
- [8] ZGONNIK V, BEAUMONT V, DEVILLE E, et al. Evidence for natural molecular hydrogen seepage associated with Carolina bays (surficial, ovoid depressions on the Atlantic Coastal Plain, Province of the USA) [J]. *Progress in Earth and Planetary Science*, 2015, 2(1): 31.
- [9] PRINZHOFER A, MORETTI I, FRANÇOLIN J, et al. Natural hydrogen continuous emission from sedimentary basins: The example of a Brazilian H₂-emitting structure [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, 44(12): 5676-5685.
- [10] FRERY E, LANGHI L, MAISON M, et al. Natural hydrogen seeps identified in the North Perth Basin, Western Australia [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, 46(61): 31158-31173.
- [11] LARIN N, ZGONNIK V, RODINA S, et al. Natural molecular hydrogen seepage associated with surficial, rounded depressions on the European craton in Russia [J]. *Natural Resources Research*, 2015, 24(3): 369-383.
- [12] CRUIKSHANK D P, MORRISON D, LENNON K. Volcanic gases: Hydrogen burning at Kilauea Volcano, Hawaii [J]. *Science*, 1973, 182(4109): 277-279.
- [13] HAO Yinlei, PANG Zhonghe, TIAN Jiao, et al. Origin and evolution of hydrogen-rich gas discharges from a hot spring in the eastern coastal area of China [J]. *Chemical Geology*, 2020, 538: 119477.
- [14] COUZIN-FRANKEL J. Obesity meets its match [J]. *Science*, 2023, 382(6676): 1226-1227.
- [15] PRINZHOFER A, TAHARA CISSÉ C S, DIALLO A B. Discovery of a large accumulation of natural hydrogen in Bourakebougou (Mali) [J]. *International Journal of Hydrogen*

- Energy, 2018, 43(42): 19315–19326.
- [16] International Atomic Energy Agency. Gestion intégrée et durable des systèmes aquifères et des bassins partagés de la région du Sahel: RAF/7/011 [R/OL]. [2024-01-07]. https://www.iaea.org/sites/default/files/18/02/raf7011_taoudeni_basin_fr.pdf.
- [17] ALBERT-VILLANUEVA E, PERMANYER A, TRITILLA J, et al. Solid hydrocarbons in Proterozoic dolomites, Taoudeni Basin, Mauritania [J]. Journal of Petroleum Geology, 2016, 39 (1): 5–27.
- [18] KAH L C, BARTLEY J K, STAGNER A F. Reinterpreting a Proterozoic Enigma: *Conophyton-Jacutophyton* Stromatolites of the Mesoproterozoic Atar Group, Mauritania [M]//SWART P K, EBERLI G P, MCKENZIE J A, et al. Perspectives in Carbonate Geology: A Tribute to the Career of Robert Nathan Ginsburg. Gent: International Association of Sedimentologists, 2012: 277–295.
- [19] VILLENEUVE M. Paleozoic basins in West Africa and the Mauritanide thrust belt [J]. Journal of African Earth Sciences, 2005, 43(1/3): 166–195.
- [20] LÉVY D, ROCHE V, PASQUET G, et al. Natural H₂ exploration: Tools and workflows to characterize a play [J]. Science and Technology for Energy Transition, 2023, 78: 27.
- [21] MAIGA O, DEVILLE E, LAVAL J, et al. Trapping processes of large volumes of natural hydrogen in the subsurface: The emblematic case of the Bourakebougou H₂ field in Mali [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, 50 (Part B): 640–647.
- [22] HUTCHINSON I P, JACKSON O, STOCKS A E, et al. Greenstones as a source of hydrogen in cratonic sedimentary basins [J]. Geological Society, London, Special Publications, 2024, 547: SP547–2023–39.
- [23] LABOU I, BENOIT M, BARATOUX L, et al. Petrological and geochemical study of Birimian ultramafic rocks within the West African Craton: Insights from Mako (Senegal) and Loraboué (Burkina Faso) Iherzolite/harzburgite/wehrlite associations [J]. Journal of African Earth Sciences, 2020, 162: 103677.
- [24] BELION Y, BENKHELIL J, GUIRAUD R. Mise en évidence de déformations d'origine compressive dans le continental intercalaire de la partie meridionale du bassin de Taoudenni (Hodh oriental, confins mauritano-maliens) [J]. Bulletin de la Société Géologique de France, 1984, S7-XXVI(6): 1137–1147.
- [25] BELLION Y, GUIRAUD R. Eocene compressive deformations west of adrar-des-iforas (Mali) [J]. Comptes rendus-academie des sciences paris serie II, 1988, 307(5): 529–532.
- [26] SAUVAGE J F, SAUVAGE M. Tectonique, néotectonique et phénomènes ignés à l'extrémité est du fossé de Nara (Mali): Daouanas et lac Faguibine [J]. Journal of African Earth Sciences (and the Middle East), 1992, 15(1): 11–33.
- [27] BLANCK J, TRICARE J. Some effects of neotectonics on the landforms in the region of the central-delta of river Niger (Mali) [J]. Comptes rendus-academie des sciences paris serie II, 1990, 310(3): 309–313.
- [28] EL-ABBASS T, PERSON A, GERARD M, et al. Geophysical and geological arguments for recent volcanic events in Faguibine Lake zone (Mali) [J]. Comptes rendus-academie des sciences paris serie II, 1993, 316: 页码范围缺失.
- [29] LEFEUVRE N, TRUCHE L, DONZÉ F V, et al. Natural hydrogen migration along thrust faults in foothill basins: The North Pyrenean Frontal Thrust case study [J]. Applied Geochemistry, 2022, 145: 105396.
- [30] JIN Zhijun, ZHANG Panpan, LIU Runchao, et al. Discovery of anomalous hydrogen leakage sites in the Sanshui Basin, South China [J]. Science Bulletin, 2024, 69(9): 1217–1220.
- [31] DAVIES K, ESTEBAN L, KESHAVARZ A, et al. Advancing natural hydrogen exploration: Headspace gas analysis in water-logged environments [J]. Energy & Fuels, 2024, 38(3): 2010–2017.
- [32] 孟庆强. 地质体中天然氢气成因识别方法初探 [J]. 石油实验地质, 2022, 44(3): 552–558.
- MENG Qingqiang. Identification method for the origin of natural hydrogen gas in geological bodies [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2022, 44(3): 552–558.
- [33] HAN Shuangbiao, TANG Zhiyuan, WANG Chengshan, et al. Hydrogen-rich gas discovery in continental scientific drilling project of Songliao Basin, Northeast China: New insights into deep earth exploration [J]. Science Bulletin, 2022, 67 (10): 1003–1006.
- [34] WANG Lu, JIN Zhijun, LIU Quanyou, et al. The occurrence pattern of natural hydrogen in the Songliao Basin, P. R. China: Insights on natural hydrogen exploration [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, 50 (Part B): 261–275.
- [35] IEA. Global hydrogen review 2023 [R]. Paris: IEA, 2023.
- [36] BALL P J, CZADO K. Natural hydrogen: The new frontier [EB/OL]. (2022-03-01) [2024-01-07]. <https://geoscientist.online/sections/unearthed/natural-hydrogen-the-new-frontier/>.
- [37] FuelCellsWorks. Ascent hydrogen fund signs new deal with Spain's Helios Aragon to explore and produce 'gold hydrogen' [EB/OL]. (2020-12-15) [2024-01-07]. <https://fuelcellworks.com/news/ascent-hydrogen-fund-signs-new-deal-with-spains-helios-aragon-to-explore-and-produce-gold-hydrogen/>.
- [38] 45-8 Energy. A promising, local project and a player in the ecological transition [EB/OL]. (2017-01-01) [2024-01-07]. <https://458energy.com/lb-en/>.
- [39] Gold Hydrogen. The Ramsay Project is investigating naturally occurring hydrogen [EB/OL]. [2024-01-07]. <https://www.goldhydrogen.com.au/ramsay-project/>.
- [40] BRIERE D, JERZYKIEWICZ T. On generating a geological model for hydrogen gas in the southern Taoudeni Megabasin (Bourakebougou area, Mali) [C]//FRANCIS M, MACAULAY F. International Conference and Exhibition, Barcelona, 2016. Houston: Society of Exploration Geophysicists, 2016: 342.
- [41] LEFEUVRE N, TRUCHE L, DONZÉ F V, et al. Native H₂ exploration in the western Pyrenean foothills [J]. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 2021, 22(8): e2021GC009917.
- [42] DERWENT R G (DICK). Hydrogen for heating: Atmospheric impacts-a literature review [EB/OL]. (2018-10-07) [2024-02-05]. <https://assets.publishing.service.gov.uk/media/65a82fee900106f5fa8/hydrogen-atmospheric-impact-report.pdf>.
- [43] SANZ J L, RODRIGUEZ N, ESCUDERO C, et al. Biological production of H₂, CH₄ and CO₂ in the deep subsurface of the Iberian Pyrite Belt [J]. Environmental Microbiology, 2021, 23 (7): 3913–3922.